

# 유압 서보 제어 기술의 동향

- 자동차에 적용 사례를 중심으로 -

## Trend of Hydraulic Servo Control Technology

- Topics on Automobile Application -

이 일 영

I. Y. Lee

### 1. 서 언

자동차는 보다 편리하게, 쾌적하고, 안전하게 그리고 지구 환경 손상을 적게 하는 방향으로 진보되어 왔으며, 특히 80년대 후반부터는 자동차의 운동 성능을 비약적으로 발전시킨 4륜 조타(4WS) 시스템, 4륜 구동(4WD) 시스템, 능동 현가(active suspension) 시스템 등과 같은 유압 제어기술을 응용한 자동차 기술이 개발되어 왔다. 그러나, 최근에는 국내·외적으로 경제 상황의 변화, 지구 환경 문제와 연계되어 기술 개발의 방향에도 변화가 감지되고 있다.

본 해설에서는 근래에 상품화된 유압 응용 시스템의 사례를 중심으로 하여 지금까지의 신기술을 총괄하고, 앞으로의 기술 발전 방향과 기술 과제에 대하여 고찰하기로 한다.

### 2. 자동차용 유압 제어 시스템의 개요

Fig. 1에 승용차에 탑재되는 유압 응용 시스템을 나타내었으며, 요약하면 아래와 같다.

#### (1) 엔진 분야

- ① 냉각 팬 구동 장치 - 유압 모터 구동 방식
- ② 연료 분사 제어
- ③ 흡·배기 밸브 구동장치 - 위상제어, 리프트 제어

#### (2) 동력 전달 계통(drive train)

- ① 유체식 자동변속기(AT)
- ② 무단 자동 변속기(CVT)
- ③ 전자제어 4륜 구동(4WD) 시스템
- ④ 슬립 제한 차동 기구(LSD)

#### (3) 새시 분야

- ① 동력 조향 장치(PS)
- ② 4륜 조향 시스템(4WS)
- ③ 능동 현가(active suspension) 시스템
- ④ ABS, TCS

### 3. 근래의 자동차 유압 제어 기술

위의 2에서 나열한 자동차용 유압 제어 장치들 가운데서 주요 시스템에 대한 기술 동향을 아래에서 설명하기로 한다.

#### 3.1 엔진 분야

##### (1) 냉각 팬 구동장치

최근의 FF형 승용차의 대형화와 더불어 엔진 냉각 팬의 구동과 제어 방식이 전동 모터식으로 바뀌는 경향이 있다<sup>1)</sup>. 냉각팬의 사양은 0.8~2.5kW에 이르는 것도 있어, 전동 멀티 팬보다도 단동 고토크 유압 모터 쪽이 컴팩트하고 가격이 저렴한 것이 이 형식을 채용하는 이유이다. 액셀 피스톤 모터를 채용하는 경우의 사양 예로서, 배제용적 2.5cc/rev, 압력 20 MPa, 회전속도 500~2500rpm, 설계수명 20만km의 것을 들 수 있다.

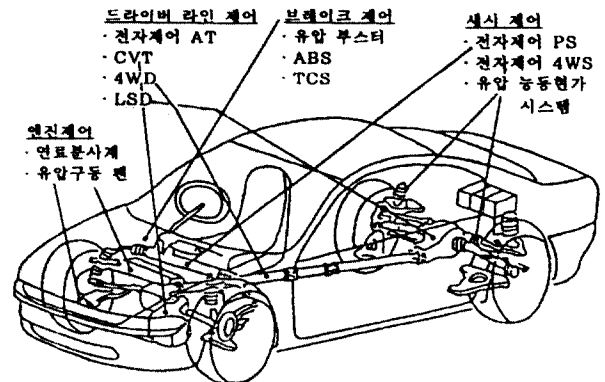


Fig. 1 자동차 유압 응용 시스템

접수일 : 1998년 4월 17일

이일영 : 부경대학교 기계·자동차공학부

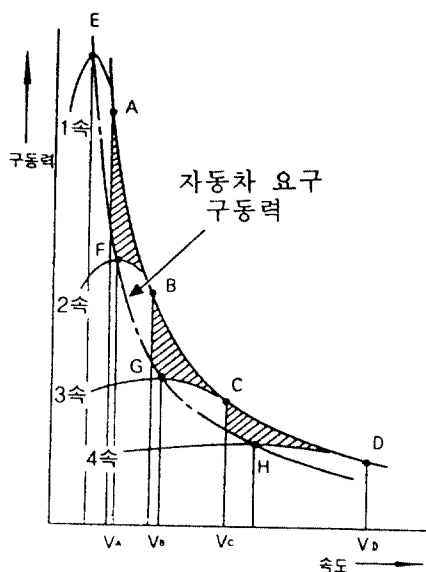


Fig. 2 차량속도-구동력 특성선도

(2) 연료 분사 제어

종래의 가솔린 엔진 분사 압력은 0.5 MPa 이하, 디젤 엔진은 50~100 MPa이며, 분사 시간은 1000 rpm에서 5 ms 정도로 짧다. 더욱이 분사시기 및 분사시간을 정확히 제어할 필요가 있으므로, 디젤 기관에서의 연비 향상, 배기가스 저감을 목적으로 고속 전자 밸브에 의한 밸브 제어 인젝터가 개발되고 있다. 연료분사 장치의 고압화에 따른 유격(oil hammer) 현상, 캐비테이션 문제, 펌프 구동 동력의 저감이 급후의 연구 과제이다.

3.2 동력 전달 계통(drive train)

(1) 유체식 자동 변속기

현재의 승용차용 자동 변속기로는 토크 컨버터, 유성기어, 유압식 변속제어 기구로 구성된 3속, 4속 또는 5속의 유체 토크 컨버터식 자동 변속기가 널리 사용되고 있다. Fig. 2에 동력전달 계통의 차량속도-구동력 선도를 나타내었다.

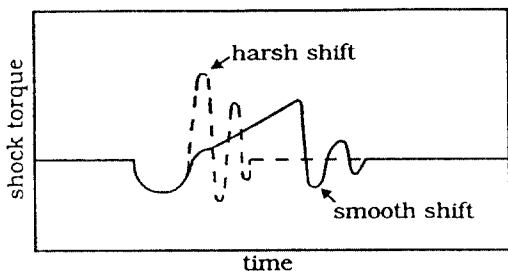


Fig. 3 변속시의 토크 변화

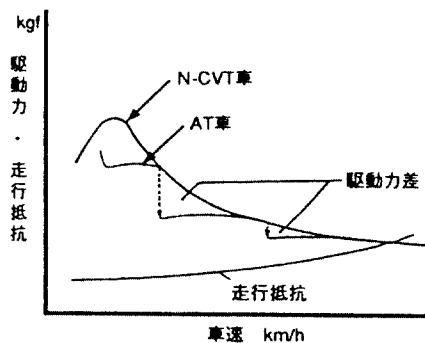


Fig. 4 CVT의 변속특성

자동차가 요구하는 구동력 선도는 E-F-G-H점을 연결하는 곡선이지만 Fig. 2에서와 같은 4단 자동변속기인 경우에는 E-A-F-B-G-C-H의 경로를 따른 변속이 일어나며, 빗금친 부분과 같은 엔진동력을 유효하게 활용할 수 없는 부분이 존재한다. 또한, A-F, B-G, C-H 구간에서의 급격한 구동력 변동은 변속시에 충격 발생의 원인이 된다. 따라서, 유체식 자동 변속기의 기술적 과제로는 동력 전달 효율의 향상, 변속시 충격의 저감 등이 있다<sup>2)</sup>.

토크 컨버터의 동력 전달 효율을 증대시키고, 엔진 브레이크의 작동이 잘 일어나도록 할 목적으로 록 업(lock-up)용 습식 다판 클러치를 사용하는 것이 일반적이며, 또한, 유성기어의 1속~4, 5속으로의 기어비 변환(up-shift, down-shift)을 위하여 습식 다판 클러치를 사용한다. 이와 같은 습식 다판 클러치를 사용한 록 업 작동 또는 변속 작동시에 클러치 조작용 실린더에 가해지는 압력 상승 형태에 따라서 자동차 동력 전달 계통에 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 과도적인 토크 변동이 발생할 수 있으며, 클러치 체결이 부드럽게 일어날 수 있도록 고속 전자 밸브에 의한 PWM제어<sup>3)</sup>, 비례전자 압력제어 밸브에 의한 연속적인 제어<sup>4)</sup>를 수행하게 된다. 변속 충격 저감을 위한 또 다른 시도는 엔진 토크 제어와 변속기 제어를 복합화시키는 방법, 축 토크를 피드백 제어하는 방법<sup>5)</sup>, 자동변속기 회전속도를 피드백 제어하는 방법<sup>6)</sup> 등이 있다.

(2) 무단 자동 변속기(CVT)

CVT는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 연속적인 변속이 가능하기 때문에 무단 변속에 의한 경쾌한 주행과 연비 향상이라는 2가지 목적을 달성할 수 있는 것이 특징이다<sup>7,8)</sup>.

Fig. 5에 CVT 제어계의 예로서 日産自動車 N-CVT('92)의 제어계를 나타낸다.

토크 컨버터 대용의 전자 클러치, 싱글 메쉬식 전후진 변환기구, 스틸 벨트와 풀리 등으로 구성되어 있다. 전자 클러치는 운전상태에 따라 단속(斷

續), 반 클러치 상태로 제어하고, 변속 풀리의 변속비 제어는 1차 풀리, 2차 풀리의 위치 제어용 유압 실린더의 압력 제어에 의한다. 또한, 엔진 제어, ABS 제어와의 통합 제어를 통하여 출발시의 충격 저감, 연비 저감을 꾀하고 있다.

(3) 전자제어 4WD와 LSD

눈길 주행시의 4WD의 구동 성능은 2WD에 비하여 매우 우수하므로 한냉지에서 호평을 얻고 있으며, 보통의 노면에서도 전·후륜에 구동력을 적절히 배분함에 따라 우수한 차량 운동 성능을 얻을 수 있다. 자동차는 핸들을 돌린 상태로 가속했을 때, 차속 상승과 더불어 통상의 후륜 구동(FR)차는 후륜의 사이드 포스가 저하하여 선회(spin)를 일으킨다. 일반적인 4WD차는 구동력이 전후에 분배되기 때문에 스핀을 발생시키기는 어렵지만 선회 반경이 증가(drive out)하며, 눈길 등과 같이 미끄러운 길에서는 이 현상이 더욱 현저하다. 전자 제어 4WD는 전·후의 구동력을 최적으로 제어함으로써 목표 라인에 충실히 추종(trace)하도록 제어가 이루어진다.

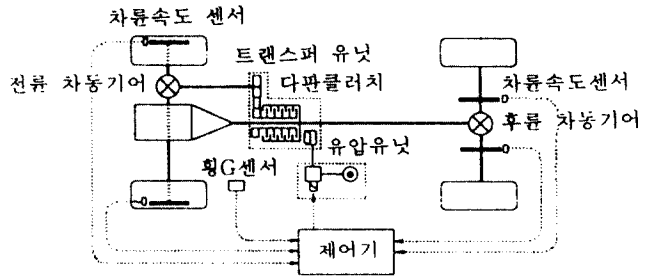


Fig. 6 전자 제어 4WD의 구성

전자 제어 4WD의 유압 제어 기술을 더욱 발전시킨 좌우륜(左右輪) 구동 토크 배분 제어 시스템(액티브 LSD)이 개발되었으며<sup>8)</sup>, 고속 주행시의 안정성, ABS 성능 향상에 크게 기여하고 있다.

3.3 새시 분야

(1) 유압식 동력 조향장치(PS)

유압식 동력 조향장치는 1950년대에 미국에서 승용차 양산 모델에 장착하기 시작한 이래로, 현재로서는 국산차에서도 장착율이 매우 높은 유압 응용 시스템이다. 이 PS 장치는 조향 핸들 조타각과 차륜의 회전각 사이의 차이에 따라서 유압 밸브(spool type 또는 rotary type)가 조작되어 피스톤에 유압력을 발생시켜 PS 동작이 일어나는 유압 위치 제어 서보 기구이다.

유압식 PS 장치에 요구되는 기술적 과제로는, 동력 소비율의 저감, 서보 기구의 안정성, 고속 주행시의 필링(feeling), 복원성, 작동유의 캐비테이션 방지, 유압계의 소음 저감 등이다.

PS용 유압 펌프로는 7(승용차)~20(트럭) cc/rev의 고정용량형 베인 펌프를 사용하기 때문에 고속 주행시에는 잉여 유량이 발생하며, 이것이 동력 소비율 증가, 조향 필링 악화의 원인이 된다. 조향 필링 개선, 즉 저속시에는 조타력을 가볍게, 고속시에는 무겁게 하는 방법으로는 펌프 유량 바이패스법<sup>9)</sup>, 유압 실린더 회귀측 체임버에 반력을 형성하는 방법<sup>1)</sup>이 있다.

Fig. 7은 전자의 방법을 적용한 예<sup>9)</sup>이며, 차속을 전기적으로 검출하여 비례 전자식 유량 제어 밸브로 공급 유량을 바이패스 시켜서 고속시의 조향 필링을 개선시키고 있다.

유압계의 압력 맥동, 소음 저감을 위해서는 배관계에 압력 맥동 저감이 용이한 2중관식 고압호스 등이 사용되고 있다.

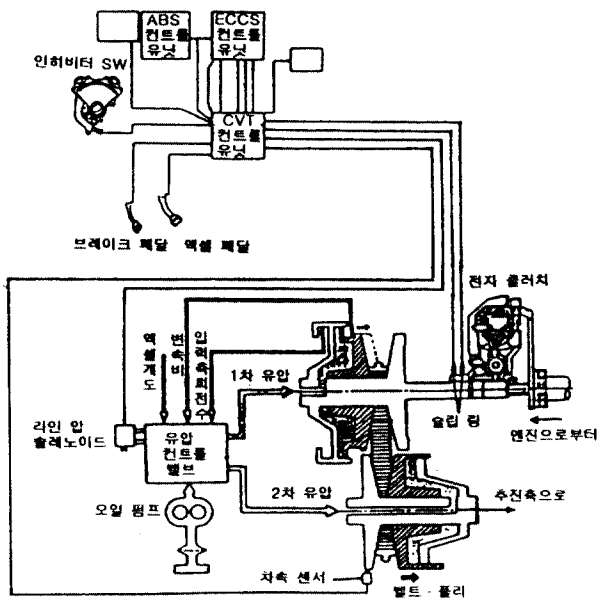


Fig. 5 CVT 제어계

Fig. 6에 전자제어 4WD의 예를 나타내었으며, 전륜 구동 토크 제어용 유압 클러치, 유압제어 유닛, 차량 횡 가속도 측정용 G센서, 차속 센서들로 이루어진다.

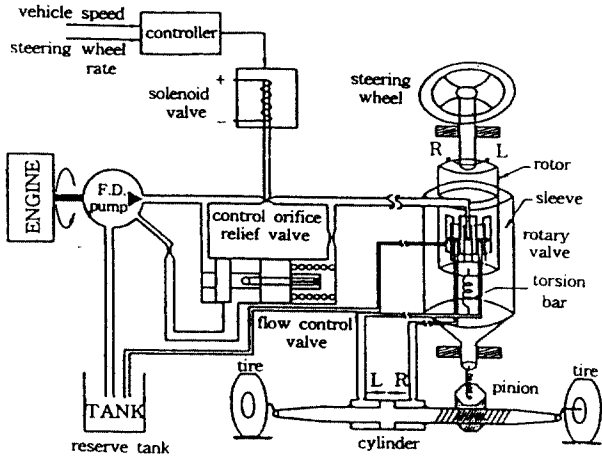


Fig. 7 PS 장치 유량 바이패스 시스템

(2) 4륜 조향 시스템(4WS)

고속 주행시 급히 핸들을 조작하면 통상의 2WS 차에서는 목표 라인으로 차체 후부가 외측으로 흔들리는 요잉(yawing) 현상이 발생하여 주행 안정감이 나빠지게 되지만, 4WS 차에서는 목표 라인과 차체의 방향이 일치한 상태로 스무드하게 차선 변경이 가능하기 때문에 조종성과 안정성을 동시에 개선시킬 수가 있다.

Fig. 8은 유압식 4WS의 예[日産自動車(株)]<sup>10)</sup>이며, 엔진구동 유압 펌프, 비례 전자 압력 제어 밸브(open center type), 유압부 고장시 중립 복귀가 가능한 스프링 센터형 유압 실린더 등으로 구성되어 있다.

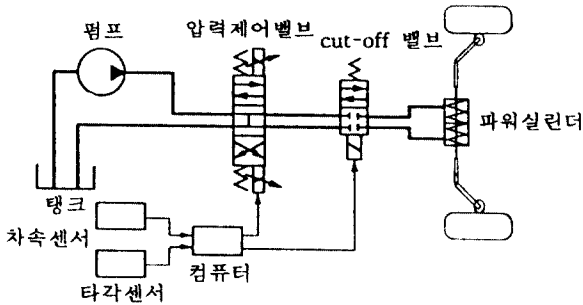


Fig. 8 CVT의 변속특성

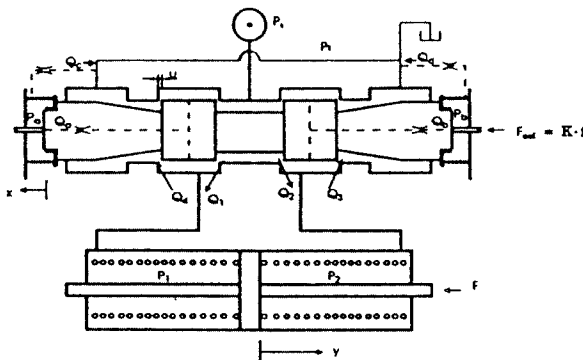


Fig. 9 4WS용 비례 압력 제어 밸브의 작동<sup>11)</sup>

4WS용 비례 전자 밸브에 요구되는 성능으로는 실린더 위치 중립시의 동력 손실 극소화, 우수한 응답 특성이며, 이러한 요구 조건을 비교적 잘 만족시키는 비례 전자 밸브(Fig. 9) 및 밸브 제어 기술이 국내에서도 개발되었다<sup>11,12,13)</sup>.

(3) 능동 현가(active suspension) 시스템

Fig. 10에 종래의 현가장치와 능동 현가장치의 성능 비교를 나타낸다. 종래의 기계식 현가장치에서는 운동 성능과 관련된 롤(roll)을 억제하는 것과 승차감에 관련된 상하 방향 진동을 억제하는 것이 양립될 수 없었지만, 능동 현가 시스템에서는 그것이 가능하게 되었다.

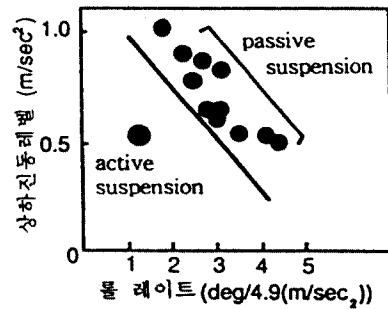


Fig. 10 차량 운동 성능과 승차감과의 양립

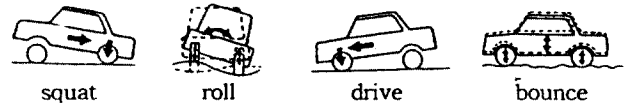


Fig. 11 자동차의 주행상태

Fig. 11과 같이 자동차의 주행 상태나 노면 상황에 따른 차체 운동을 각종 센서들로 계측하여 현가장치의 감쇠력, 스프링 정수, 차고(車高)를 적절히 조절하는 제어를 수행하는 것이 능동 현가장치의 목적이다.

1980년대 중반부터 세계의 주요 카 메이커에서 능동 현가장치 개발이 시작되어 1987년에 로터사가 F1에 탑재한 이후, 1989년에 닛산, 토요타사에서 시판 승용차에 처음으로 능동 현가장치를 적용하였으며<sup>14)</sup>, 국내에서는 G7 프로젝트의 일부로 1992년부터 개발에 착수하여 주요 기술의 개발이 이루어진 것으로 알려져 있다<sup>15)</sup>.

Fig. 12는 닛산 자동차의 Infiniti Q45에 탑재된 능동 현가 시스템의 유압계를 나타내며, 피스톤식 유압 펌프, 다기능 밸브, 비례 압력 제어 밸브(4개), 각종 어큐뮬레이터(4개), 액추에이터(4개), G 센서(6개), 차고 센서(4개), ECU 등으로 구성되어 있다.

Fig. 13에는 비례 전자 압력 제어 밸브(PCV)와 액추에이터의 결합 형태를 나타내었으며, 이 PCV의 액티브 제어 주파수 영역은 2 Hz 이하이고, 2~10 Hz 정도의 주파수 영역에서는 PCV가 기계적 피드백 제어(mechanical feedback control) 기능에 의하여 감쇠력 제어가 수행된다. 제어 로직으로는 개발 초기부터 스카이 훅(sky hook) 감쇠 방식(차체의 상하 방향 가속도를 검출하고, 그 적분치인 차체의 절대 상하 속도에 따라서 액추에이터에 유압유를 공급하여 차고(車高)를 제어하는 방식)이 사용되었으며<sup>16,17)</sup>, 최근에는 LQG 제어 이론<sup>18)</sup> 등의 응용이 시도되고 있다. 또한, 능동 현가장치용 유압계 고압부 및 저압부의 맥동 저감 기술<sup>19,20)</sup> 유압회로 설계기술<sup>21)</sup> 등이 보고되고 있다.

(4) ABS, TCS

자동차의 제동, 구동 성능은 타이어와 노면 사이의 마찰 특성에 따라 크게 달라진다. 따라서, 제동 및 구동 상태 제어의 목적은 제동 또는 구동시에 타이어의 기능이 가장 효과적으로 그리고 균형 있게 발휘되도록 하는 데에 있다. 이를 위한 제어 방법으로는 타이어와 노면 사이의 속도차(slip ratio)를 제어하는 방법이 일반적으로 사용되며, 제동시의 부(負)의 슬립 컨트롤 시스템을 ABS (anti-lock brake system)라 부른다.

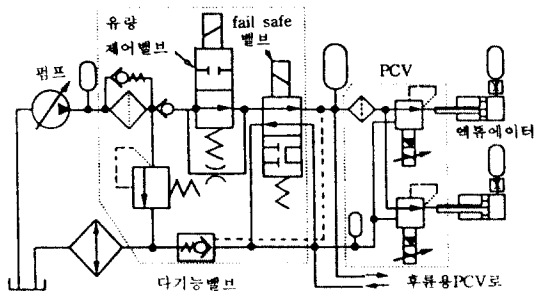


Fig. 12 능동 현가 유압 시스템의 예<sup>8)</sup>

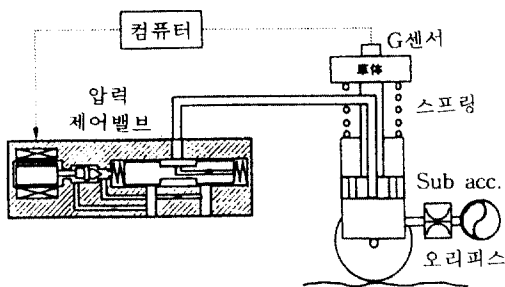


Fig. 13 PCV와 액추에이터의 조합 형태

제동 도중에 타이어에는 Fig. 14에 나타낸 바와 같이 타이어 진행 방향과 역방향으로 제동력이 작용하고, 진행 방향과 직각 방향으로 사이드 포스가 작용한다.

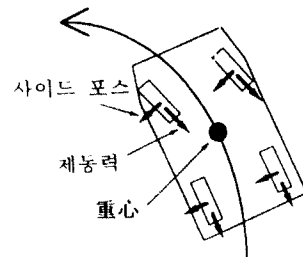


Fig. 14 제동 도중에 타이어에 작용하는 힘

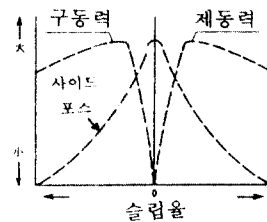


Fig. 15 제동·구동시 타이어와 노면 사이의 특성

일반적으로 타이어와 노면 사이의 슬립율에 따라 제동력, 구동력 및 사이드 포스가 어떻게 변화하는가를 Fig. 15에 나타내었다. 슬립율이 10~30%에서 제동력은 최대로 되고, 그 이상의 슬립율에서는 제동력은 감소한다. 또, 사이드 포스는 슬립율 0에서 최대로 되며 슬립율이 증가함에 따라 감소한다. 이러한 설명은 제동시(負의 슬립시)의 현상에 관한 것이지만 구동시(正의 슬립시)에도 거의 마찬가지로 특성을 나타낸다. 이 그림으로부터 제동시의 휠 록(wheel lock), 구동시의 휠 스핀(wheel spin)은 제동력, 구동력을 약화시킬 뿐만 아니라 차량을 불안정한 상태로 만드는 요인이 됨을 알 수 있다.

ABS의 개발은 1969년 2륜 제동 방식(미국)으로 시작되어 1978년 4륜 제동 방식(독일)이 개발되었고, 최근의 것은 차륜 회전 속도로부터 가속도를 산출하여 그 값이 한계치를 넘으면 고속 on/off 밸브로 브레이크 조작 유압 실린더의 유압을 감압, 가압 제어하여 차륜의 록(lock)을 회피하는 브레이크 장치로 실용화되어 있다<sup>22)</sup>.

TCS의 구동력 제어 방법으로는 Fig. 16에 나타낸 바와 같이 여러 가지가 있다. 즉, 엔진 출력 자

체를 드로틀 밸브, 점화 계통, 연료 계통으로 제어하는 방법, 그리고 이들을 조합한 방법 등이다.

여기서는 유압 제어 기술을 응용한 예로서 브레이크 방식에 의한 ABS·TCS 겸용의 차량 안정성 향상 제어 시스템(Fig. 17)을 소개한다. 이 시스템은 임의의 차륜에 브레이크를 걸어서 차체의 진행 방향을 바꾸는 모멘트를 발생시켜 자세를 제어하는 시스템이며, 순환식 ABS 유압 회로를 베이스로 하고 있다. 펌프 RCP의 출력 압력을 캘리퍼에 가하여 브레이크를 걸며, 펌프 PCP에서 만든 저압은 피스톤을 거쳐서 펌프 RCP의 흡입측에 가해진다. 이 시스템에는 조타각 센서, 마스터 실린더 압력 센서, 차량 거동 검출용 요레이트(yaw rate) 센서, 횡가속도 센서, 차륜 속도 센서 등의 센서가 필요하는 등으로 종래의 ABS, TCS에 비하여 복잡한 기구로 되는 것을 피할 수가 없다.

4. 결 언

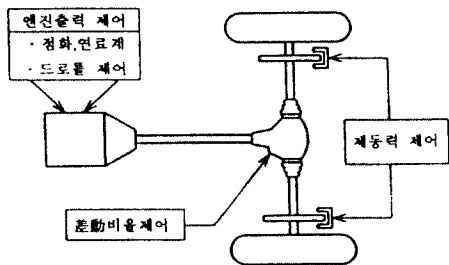


Fig. 16 TCS의 제어 방법

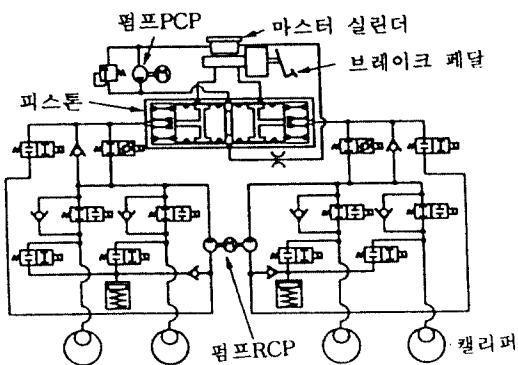


Fig. 17 ABS·TCS 통합형 차량 안정성 향상 제어 시스템의 예

자동차용 유압 제어 응용 시스템은 전자 기술의 진보와 더불어, 자동차의 고기능화를 위하여 확대

발전해 왔으며, 앞으로도 이러한 경향은 꾸준히 진전될 것으로 생각된다. 그러나, 유압 제어 응용 시스템을 더욱 확대 발전시키기 위해서는 다음과 같은 과제를 극복해 가야 할 것이다.

- (1) 유압 시스템의 특징을 살린 매력적인 시스템의 창출
  - (2) 유압 시스템의 정밀 가공품을 저렴한 비용으로 생산할 수 있는 생산 설계 기술의 개발
  - (3) 유압 시스템의 저진동, 저소음화 기술의 개발
- 기술적으로 넘어야 할 난관도 많지만, 유압 시스템이 갖는 매력도 결코 가볍게 볼 수 없으므로 앞으로의 이 분야 발전을 기대해 본다. 본 해설이 자동차용 유압 제어 시스템에 대한 이해를 돕는데 다소나마 기여하기를 기대한다.

참고문헌

1. 田中裕久, “自動車における油壓技術”, 日本油空壓學會誌, Vol. 21, No. 2, pp. 112~119, 1990
2. 이일영, 양경욱, 윤소남, “차량용 자동 변속기 유압 제어계의 개발 동향”, 한국자동차공학회지, 제 17권 5호, pp. 28~35, 1995
3. 加藤, 田中, “PWM制御壓力制御弁による自動變速器の電子油壓制御”, 日本油空壓學會誌, Vol. 21, No. 2, pp. 169~174, 1990
4. 양경욱, 오인호, 이일영, “비례 전자 밸브를 사용한 유압 서보계의 압력 제어”, 대한기계학회 논문집, 제 21권 8호, pp. 1229~1240, 1997
5. 木下, 外 3人, “靜電容量式トルクセンサの開発”, 自動車技術會講演會前刷集, 892, pp. 333, 1989
6. 眞田, 北川, “油壓系のモデル化誤差を考慮した自動變速器における回轉數の2自由度制御”, 計測自動制御學會論文集, Vol. 32, No. 1, pp.106~113, 1996
7. 이충섭, 조희복, “승용차용 무단 변속기의 개발 동향”, 한국자동차공학회지, 제 17권 5호, pp. 17~27, 1995
8. 井上, “油壓應用システムの高機能化”, 日本油空壓學會誌, Vol. 25, No. 2, pp. 262~269, 1994
9. W. C. Yang, “Fluid Control Systems in Automotive Applications”, Proc. of IFAC workshop on Trends in Hydraulic & Pneumatic Components & Systems, pp. 1~13, 1994
10. 江口, 外 6人, “新四輪操舵システム日産 Super

- HiCASの開発”, 日産技報, 25号, pp. 19~29, 1987
11. 오인호, 장지성, 이일영, “비레 압력 제어 밸브의 부하압력 피드백 방법 개선”, 대한기계학회논문집, 제 21권 5호, pp. 719~726, 1997
  12. 오인호, 양경욱, 이일영, “전자 유압식 후륜 조향 장치의 응답특성 개선”, 한국자동차공학회논문집, 제 5권 6호, pp. 192~201, 1997
  13. 오인호, 장지성, 이일영, “승용차 4WS 장치용 비레 압력 제어 밸브의 특성”, 한국자동차공학회논문집, 제 4권 4호, pp. 87~96, 1996
  14. 高橋, “アクティブサスペンションの動向と油空壓技術”, 日本油空壓學會誌, Vol. 21, No. 2, pp. 120~126, 1990
  15. 차세대 자동차기술 개발사업단, “제 5회 차세대 자동차기술 Workshop 논문집”, 자동차부품 연구원, pp. 508~551, 1997
  16. 福島, 外 4人, “油壓アクティブサスペンションによる車輛の振動制御”, 日本機械學會論文集(C編), Vol. 57, No. 535, pp. 722~726, 1991
  17. 홍예선, 外 4인, “승용차용 능동제어식 현가 시스템의 개발 (1),(2)”, 한국자동차공학회논문집, 제 2권 2호, pp. 73~94, 1994
  18. 장효환, 外 4인, “유압제어 알고리즘 개발에 관한 연구”, G7과제 1단계 보고서, 만도기계(주)중앙연구소 편, pp. 1~315, 1994
  19. 이일영, 外 4인, “능동 현가장치용 유압 펌프의 유량 맥동 해석”, '97년도 한국자동차공학회 추계대회 논문집, Vol. I, pp. 513~518, 1997
  20. I. Y. Lee, Y. G. Jung, Y. H. Yoon, “Effective Smoothness of Surge Pressure Generated in the Return Line of Active Suspension Hydraulic System for Vehicle”, Proceedings of the 3rd Int. Symp. on Fluid Power, Yokohama, pp. 373~378, 1996
  21. 이일영, 外 4인, “실차 유압 관로계 설계기술 개발”, 제 5회 차세대 자동차기술 Workshop 논문집, 자동차부품연구원, pp. 532~539, 1997
  22. 大澤, “制驅動制御(ABS)”, 日本油空壓學會誌, Vol. 28, No. 2, pp. 170~175, 1997
  23. A. T. Zanten, R. Erhardt, G. Pfaff, “VDC, the Vehicle Dynamics Control Systems of Bosch”, SAE950759, 1995